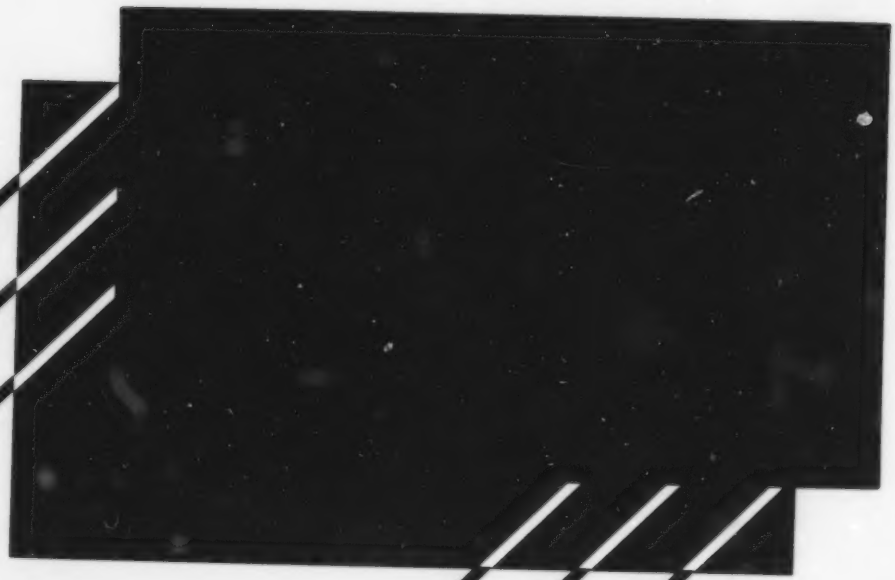
Gouvernement du Canada
Ministère des Communications

Government of Canada
Department of Communications

Le Centre canadien de recherche sur l'informatisation du travail
Canadian Workplace Automation Research Centre



Canada

REPRÉSENTATION DES CONNAISSANCES : LE POINT SUR LA QUESTION

par

Kim Dalkir

Ce rapport est le fruit de recherches effectuées au Centre Canadien de recherche sur l'informatisation du travail (CCRIT), Laval

Communications Canada

Novembre 1987

92-05706/

No. cat. Co 28-154-1990F
ISBN 0-662-96178-1

1. SOMMAIRE

Ce document présente les principaux schèmes de représentation des connaissances utilisées dans le domaine de l'intelligence artificielle. Tout d'abord, un aperçu général des forces et lacunes de chacune des méthodes permet d'évaluer et de comparer les divers types de représentation des connaissances. Viennent ensuite un certain nombre de schèmes de classification qui serviront de cadre de référence général. Finalement, des exemples de chaque type de représentation sont présentés en annexe.

Les différents types de représentation traités dans ce document comprennent : les réseaux sémantiques, les triplés objet-attribut-valeur, les cadres, les scripts, les graphes de dépendances conceptuelles, les méthodes basées sur des règles ou la logique, les graphes génétiques, les réseaux de contraintes, les réseaux de dérivations conceptuelles et les modèles de concept généralisé.

Même si la plus grande partie du travail en matière de représentation des connaissances se fait dans le domaine de l'intelligence artificielle, en particulier les procédures d'ingénierie de la connaissance requises pour le développement des systèmes experts, cet aperçu général couvre d'autres domaines contributifs. On aborde également de façon succincte les applications à divers domaines telles la psychologie et l'éducation.

1. INTRODUCTION

Une représentation de connaissances se compose des connaissances relatives à un domaine de problème particulier, comme le fait une base de données; il faut cependant établir plusieurs distinctions importantes. Le traitement des connaissances, contrairement au traitement des données, fait appel à l'inférence et au raisonnement. Les connaissances sont plutôt qualitatives par nature, contrairement aux données qui sont généralement quantitatives ou à tout le moins quantifiables. Ceci signifie qu'une base de connaissances et sa représentation (la représentation des connaissances) seront nécessairement imprécises, incertaines et parfois anecdotiques. C'est là la nature même des connaissances, ce qui ne nous empêche pas de les utiliser de façon efficace tous les jours.

Chaque structure de connaissance peut faire partie d'un système plus vaste et, à son tour, subsumer un ou plusieurs de ses propres sous-systèmes. La connaissance est donc essentiellement structurée par nature. Une représentation des connaissances doit donc être structurée pour saisir et représenter les connaissances relatives aux modèles que l'on rencontre couramment dans le monde réel. L'objet est de pouvoir saisir autant de généralisations relatives au domaine que possible, afin de représenter des domaines de plus en plus vastes.

Une représentation est une version stylisée du monde. Malheureusement, elle reproduit les ambiguïtés référentielles que l'on retrouve dans le monde réel. Le langage en est un bon exemple. Les mots sont probablement les premières représentations de connaissances que nous utilisons et ils sont loin d'être des outils précis, non ambigus. D'autre part, une base de données est nécessairement non ambiguë puisque nous sommes obligés de définir explicitement dans la structure toutes les définitions et relations entre les objets de données. Une structure de connaissance est également plus complexe en ce sens qu'elle contient également les règles et conditions qui déterminent la façon dont les données seront utilisées et le moment où elles le seront. Ceci implique souvent de la perspicacité, de l'observation et un jugement subjectif.

Contrairement aux données, les connaissances ne sont pas simplement un ensemble de faits mais plutôt un ensemble de données significatives reliées par une

structure d'ensemble. Un schème de représentation des connaissances nous permet donc de modéliser cette structure ou ce cadre d'éléments de connaissance requis pour comprendre un problème donné, ou à tout le moins certaines facettes de ce domaine. Nous pouvons alors extraire l'information dont nous avons besoin, avec ses conséquences, dans un délai raisonnable. Les connaissances peuvent être organisées et représentées tout comme les mots dans une langue, pour désigner des concepts ou des relations conceptuelles. Si on explicite les éléments et leurs interrelations, la base de connaissances devient plus accessible et, par conséquent, plus compréhensible. Si les connaissances constituent un modèle du monde réel et si une représentation des connaissances est un modèle de connaissance, la représentation est en fait un modèle d'un modèle qui constitue un univers analogue à celui du monde réel.

Un bon schème de représentation des connaissances devrait présenter les caractéristiques suivantes :

1. *capacité représentationnelle* - la capacité de représenter tous les types de connaissances et de savoir-faire requis pour le domaine;

2. *capacité inférentielle* - la capacité de déduire de nouvelles connaissances à partir des connaissances existantes;

3. *efficacité inférentielle* - la capacité d'intégrer des données additionnelles pertinentes à la structure de connaissance lorsque le besoin s'en fait sentir;

4. *efficacité acquisitionnelle* - la capacité d'acquérir facilement de nouvelles informations.

Nous avons besoin de représenter les connaissances pour établir les liens qui existent entre les concepts et pour éviter ceux qui sont inadéquats. Cela nous permet de voir de quelle façon les concepts sont liés les uns aux autres à un niveau plus global. Grâce à un tel aperçu général des connaissances, tout comme une carte nous permet d'avoir une vue d'ensemble d'une ville, nous pouvons faire des choix plus avisés relativement à l'état de nos connaissances ou de celles de quelqu'un d'autre. Ceci favorise une compréhension plus générale et, en même temps, plus cohérente du domaine, que la représentation des connaissances soit intégrée à un système expert ou simplement tracée sur un tableau. Lorsque vous explicitez votre représentation des connaissances, les autres savent ce que vous savez, ce que vous ne savez pas et ce qu'il est impossible de connaître à l'heure actuelle.

Ainsi, une représentation des connaissances formalise la base de connaissance des concepts qui constitue un sous-ensemble du domaine de tâches ou du domaine. Il s'agit d'un sous-ensemble spécifique des compréhensions possibles qui pourraient résulter. La connaissance pourrait en fait être imparfaite; mais ceci ne deviendra évident que lorsqu'on tentera d'élaborer la représentation des connaissances (ce qui est une autre justification de son utilisation dans le processus de communication).

2. CLASSIFICATION DES MÉTHODES DE REPRÉSENTATION

Plusieurs schèmes de représentation des connaissances ont été développés dans le domaine de l'intelligence artificielle. Même s'il existait des représentations des connaissances bien avant que l'on tente de doter les ordinateurs d'une certaine forme d'intelligence, l'expression "représentation des connaissances" est maintenant presque exclusivement utilisée dans le domaine de l'IA. Le présent aperçu général est donc principalement fondé sur la recherche dans ce domaine.

La principale dichotomie dans la représentation des connaissances découle du type de connaissance qui doit être représenté : statique ou dynamique. Les représentations *déclaratives* sont liées à la connaissance statique, surtout sous forme de faits (p. ex. Fido est un chien), alors que les représentations *procédurales* impliquent des processus, par exemple la façon d'utiliser un élément d'information particulier (p. ex. pour apprendre à Fido à marcher au pas, reportez-vous à la section 4.3 du manuel). L'avantage de la méthode déclarative réside dans le fait qu'il suffit d'enregistrer une seule fois le fait ou l'élément d'information, sans égard au nombre de fois ou aux différentes façons dont il sera utilisé. Il est également aisé d'ajouter de nouvelles connaissances à ce type de représentation. Quant à la méthode procédurale, elle permet de représenter plus aisément le savoir-faire, l'information probabiliste et l'heuristique (règles ad hoc utilisées pour accroître l'efficacité). En général, les deux types de connaissances sont requises pour la plupart des domaines; par conséquent, on aura sûrement besoin de deux types de représentation pour saisir les connaissances et le savoir-faire dans un domaine donné.

Les réseaux sémantiques, les cadres et les scripts sont des représentations déclaratives courantes. Quant aux représentations procédurales les plus fréquentes, on

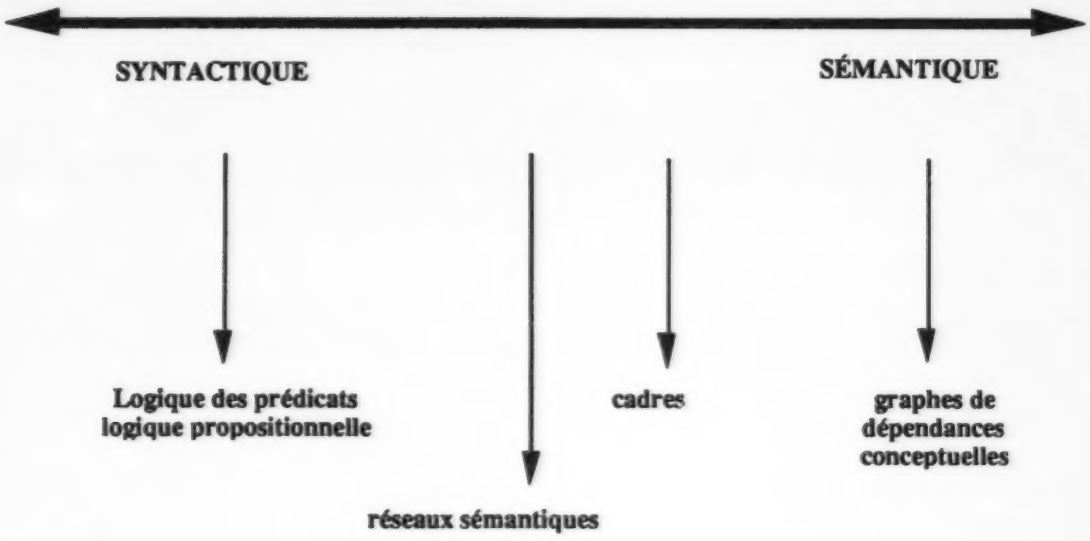
retrouve les systèmes basés sur les règles ou la logique, par exemple le calcul des prédicats. La section qui suit traite en profondeur de toutes ces représentations.

Les schèmes de représentation peuvent également différer à d'autres niveaux : connaissance superficielle ou approfondie, connaissance qualitative ou quantitative, connaissance approximative (incertaine) ou exacte (certaine), connaissance spécifique ou générique, et connaissance descriptive ou prescriptive. Ainsi, à chaque forme de connaissance peut correspondre un différent type de représentation. Dans tous les cas, la représentation des connaissances choisie doit être explicable et justifiable en fonction de la base de connaissance sous-jacente modélisée, et la représentation doit être restructurable et réorganisable au besoin.

On peut également catégoriser les méthodes de représentation des connaissances en fonction de leur place dans un continuum dont les limites seraient une représentation syntactique à 100 % et une représentation sémantique à 100 % (voir la figure 1). Par exemple, une représentation basée sur la logique serait pratiquement purement syntactique au niveau de la forme, alors que les mappes de dépendances conceptuelles seraient presque purement sémantiques, toujours au niveau de la forme. Le critère utilisé est la profondeur de la signification ou de la compréhension représentée par la structure en question.

Une représentation des connaissances, qu'elle soit sous forme textuelle, vidéo ou graphique, révèle la façon dont l'auteur "comprend" la connaissance modélisée. Ainsi, une représentation de connaissances est une représentation publique de la compréhension qu'a un individu ou un groupe d'une chose. Si l'individu est un "expert" reconnu dans le domaine, la connaissance modélisée devient alors une expertise dans ce domaine. Nous pouvons alors interagir avec cette représentation et la manipuler. Par exemple, nous utilisons des mots en langage naturel pour communiquer. Nous n'accédons pas directement aux concepts eux-mêmes. Les représentations des connaissances peuvent offrir un grand potentiel sous forme de méta-mots ou outils pour nous aider à communiquer nos pensées.

Figure 1. Spectre des représentations des connaissances



3. APERÇU GÉNÉRAL DES REPRÉSENTATIONS

Les modèles de connaissances humaines sont souvent représentés à l'aide de différents types de réseaux associatifs. Ceci présente un intérêt intuitif puisque l'on croit que la mémoire humaine est organisée de cette façon; mais il y a cependant des problèmes, en particulier avec les types de dépendance que l'on peut modéliser. Même s'il est relativement simple de modéliser le "voisinage" ou la connexité explicite, il est plus difficile de modéliser les relations conceptuelles telles la causalité et la dépendance conditionnelle. Pour communiquer une signification au-delà de la connexité, il faut recourir à une typologie de graphe qui peut établir des distinctions sémantiques entre la connexité directe et la connexité indirecte. De façon plus précise, on a besoin de graphes orientés pour saisir la complexité de la connaissance; les graphes non orientés ne nous donnent que le squelette de cette base de connaissances.

Pour représenter visuellement l'organisation des connaissances, on fait généralement appel à un modèle structurel quelconque. La connaissance est structurée comme une série de faits, chacun étant relié à un ou plusieurs faits à l'aide

d'un lien causal. Les cartes cognitives, les modèles mentaux, les schémas d'influence, les sociogrammes, etc. sont tous similaires à cette approche. Une fois les blocs fonctionnels définis, p. ex. les concepts, on peut les relier pour constituer un réseau relationnel. Les concepts réunis sont le fondement même de toute base de connaissances. Un ensemble de règles est généralement utilisé et le résultat final est un diagramme spatial présentant tous les concepts et les liens qui existent entre eux.

L'espace sémantique des concepts est généralement représenté de différentes façons. Certains connecteurs peuvent utiliser la relation "c'est un" ou "a un", ou encore des descripteurs plus complexes tels "est analogue à", "est un exemple de", et ainsi de suite. Ce cadre conceptuel constitue la base du domaine d'intérêt ou du domaine qui doit être enseigné ou appris. En général, le nombre de sujets représentés donne une indication de la complexité globale de la base de connaissances. Dans le cas des structures de connaissance très complexes, il faudrait probablement aller au-delà de ce simple réseau restreint de distances sémantiques et utiliser les représentations déclaratives et procédurales de la connaissance.

4.1 Réseaux sémantiques

Il s'agit de la forme la plus générale de la représentation des connaissances. Le réseau sémantique décrit les objets et les événements sous une forme déclarative. On les utilisait au départ pour représenter la signification de mots et phrases anglais, d'où leur nom. Les réseaux sémantiques sont également la forme de représentation des connaissances la plus flexible car ils imitent la mémoire humaine, qui est une sorte de réseau associatif. (Les réseaux sémantiques étaient au départ un modèle psychologique de la mémoire humaine). Les noeuds de ce réseau sont connectés par des arcs ou des liens qui décrivent une relation telle "c'est un" ou "a un". Les liens peuvent aussi être des relations définitionnelles, des exemples, des relations heuristiques, des liens de causalité et toute autre forme d'association. Les noeuds et les liens sont généralement étiquetés et les nouveaux noeuds et liens peuvent être aisément définis et intégrés à la représentation des connaissances.

Les réseaux sémantiques présentent cette caractéristique fort utile qu'est l'héritage. Il s'agit de cette fonction par laquelle un noeud hérite automatiquement de toutes les propriétés attribuées aux noeuds supérieurs plus généraux auquel il est

connecté. Le seul inconvénient de cette fonction est qu'il devient très difficile de traiter les exceptions qui peuvent se présenter dans le contexte du domaine.

Les représentations par réseau sémantique ressemblent donc beaucoup aux systèmes de classification utilisés dans les bibliothèques (système Dewey). Par exemple, les liens entre les noeuds peuvent être bidirectionnels en vue de l'exécution de recherches d'intersection (p. ex. pour trouver ce que des paires données de noeuds ont en commun). Le réseau peut être non hiérarchique ou non linéaire, dépendamment du domaine modélisé. Cette approche convient plus particulièrement pour les domaines où les taxonomies sont bien établies, par exemple la biologie et le langage naturel.

Le coeur d'un réseau sémantique se compose d'une série de concepts codés, tandis que l'unité d'analyse de base est un graphe conceptuel constitué de concepts associés les uns aux autres. Ces graphes peuvent à leur tour être reliés à d'autres graphes pour former un réseau sémantique plus vaste. Les réseaux sémantiques constituent donc un classement intelligent des connaissances en un modèle descriptif intégré. Ce processus, présenté à la figure 2 ci-dessous; est en fait similaire aux étapes de la construction d'un modèle scientifique.

Figure 2. Méthodologie du réseau sémantique

Précepts | **Relations conceptuelles** | **Graphes conceptuels** | **Réseau sémantique**

Collins et Quillian (voir bibliographie) ont proposé une méthode intéressante pour mesurer quantitativement la connexité sémantique des concepts (mesure de la distance sémantique entre les concepts). Ils ont utilisé le temps de réponse dans un exercice d'association libre pour évaluer la façon dont deux concepts sont reliés dans l'esprit d'une personne. Par exemple, au mot "oiseau", la plupart des gens répondaient "aile" ("a une") avant le mot "canari" ("est un exemple de"). On peut alors mesurer le temps écoulé avant que chaque mot ne soit exprimé. En réalité, il peut s'agir d'une extériorisation de la façon dont nous mémorisons les connaissances, en préférant le niveau d'abstraction le plus élevé possible et les attributs plus généraux.

Pour résumer, les réseaux sémantiques sont utiles lorsque les connaissances à représenter sont redondantes, sans de nombreuses exceptions et se prêtent bien à une structure associative.

4.2. Triplés objet-attribut-valeur

Dans ce schème, les objets peuvent être des entités physiques ou conceptuelles, les attributs peuvent être des caractéristiques générales ou des propriétés de ces objets, et les valeurs peuvent être des caractéristiques spécifiques de l'objet. La valeur d'un attribut indique la nature exacte d'une situation ou d'un objet particulier. Le fait de donner une valeur spécifique à un attribut général s'appelle "instanciation". Par

exemple, l'objet "pomme" possède l'attribut "couleur" et la pomme Macintosh possède la valeur "rouge" pour cet attribut.

Une représentation objet-attribut-valeur est en fait un réseau sémantique spécialisé où seules les relations "c'est un" ou "a un" sont permises entre les objets dans la représentation; il n'y a également que trois types de noeuds (objet, valeur et attribut).

On peut représenter les connaissances statiques et dynamiques à l'aide de ce schème. Dans le cas de la connaissance statique, les objets qui ne changent pas ont des attributs généraux. Cependant, dans le cas de la connaissance dynamique, l'objet peut changer, et change, d'un cas à l'autre. La deuxième caractéristique importante de la représentation objet-attribut-valeur est la façon dont les objets peuvent être ordonnés et reliés les uns aux autre. Les graphiques peuvent être arborescents, l'objet supérieur, soit la "racine", servant de point de départ. Ces arbres peuvent également avoir leur propre dynamisme. Les objets autres que l'objet racine peuvent également avoir de multiples instances. En fait, les arbres d'objets s'enchevêtrent souvent de sorte que les sujets subordonnés finissent par être reliés à plus d'un objet de plus haut niveau et peuvent ainsi hériter des propriétés de plusieurs sources.

On peut faire appel aux représentations objet-attribut-valeur pour traiter les connaissances incertaines ou incomplètes en utilisant des facteurs de certitude. Ces derniers servent à quantifier le degré de certitude que l'on peut attribuer à chaque fait ou à chaque conclusion inférentielle tirée à partir de ces faits. Le meilleur exemple connu est le système expert MYCIN, qui fournit des diagnostics d'infection bactérienne en ajoutant un facteur de certitude (p. ex. le patient A souffre de l'infection XYZ; le facteur de certitude de 0,70 ou 70 %). Il ne s'agit pas de probabilités au sens statistique du terme (même si cela pourrait être le cas), mais plutôt de la mesure d'une croyance subjective ou d'une préférence subjective (p. ex. j'aime les pommes; les pommes vertes 0,3 et les pommes rouges 0,7).

Enfin, certains systèmes de connaissances sont construits autour d'un simple groupe de faits ou d'objets. Dans ce cas, la paire objet-attribut suffit pour saisir toutes les connaissances requises. Aucune valeur n'est requise pour les attributs puisqu'il n'y a pas de modification, et, par conséquent, pas d'héritage.

4.3 Cadres

Le schème de représentation des connaissances par cadres peut décrire les objets en fonction d'un ensemble d'attributs qu'ils possèdent. Il utilise une forme déclarative de représentation des connaissances. Il s'agit d'une méthode générale qui fonctionne bien pour la représentation des objets complexes qu'il est possible de considérer selon diverses perspectives.

Il a été prouvé que les humains ne traitent pas l'information à partir de zéro mais plutôt à partir des structures existantes. Ainsi, lorsque nous sommes confrontés à un nouveau fait, nous ne créons pas une nouvelle structure de connaissance pour décrire cette situation : nous songeons plutôt aux situations similaires que nous avons déjà vécues afin de décider de la meilleure façon de réagir face à cette nouvelle situation. Nous avons, dans notre mémoire, une vaste gamme d'expériences qu'il est possible d'appliquer à la nouvelle connaissance. Un cadre est généralement une représentation de ce type de connaissance commune. Il décrit en général une catégorie d'objets à l'aide d'une série de cases qui décrivent elles-mêmes les divers aspects des objets. Ces cases peuvent renfermer des conditions auxquelles on a attribué des valeurs implicites, ou encore des informations procédurales précisant, par exemple, le prochain cadre à utiliser.

On peut regrouper des cadres sélectionnés et constituer un système de cadres afin de représenter les différents points de vue pour le même objet. Par exemple, on peut étudier un sujet selon différentes perspectives, dépendamment de nos propres antécédents. Cela nous permet d'inférer des faits non observés à l'égard de nouvelles situations et de représenter les instances types des concepts qu'ils représentent. On peut utiliser des évidences partielles de la même façon pour sélectionner un premier cadre. Celui-ci peut être instancié au fur et à mesure que l'on obtient plus d'informations sur l'instance spécifique ou la situation courante. Si on ne peut trouver de valeur appropriée, on sélectionne un nouveau cadre en fonction du degré de similitude avec le cadre original. Grâce à cette stratégie, on maintient un fil de continuité (se reporter aux réseaux de similarité présentés en annexe).

Les cadres sont donc des structures de données utilisées pour représenter une situation stéréotypée. Plusieurs sortes d'informations sont rattachées à chaque cadre, par exemple comment utiliser ce cadre (connaissance procédurale) et quels sont les

cadres connexes (connaissance déclarative). L'organisation ressemble beaucoup à celle d'un réseau sémantique - en fait, les cadres et les réseaux sémantiques sont, en termes plus généraux, tous les deux des "systèmes" basés sur des cadres. Ces systèmes sont particulièrement utiles dans les domaines où les attentes jouent un rôle important, puisque celles-ci peuvent être facilement exprimées à l'aide de relations de cadres.

Les cadres permettent donc une représentation plus riche des connaissances mais, en contrepartie, ils sont plus difficiles à développer à cause de cette complexité. Ils offrent une grande souplesse du fait qu'ils permettent la sémantique duale (connaissances déclaratives et procédurales). Les éléments procéduraux correspondent aux instructions qui permettent de déterminer ou de calculer une entrée. On peut y ajouter de l'information provenant des autres cases ou cadres. Ainsi, les deux formes de connaissances peuvent être représentées dans un même cadre, ce qui facilite toute transformation de l'une à l'autre. Cela accroît également la puissance, la généralité et la popularité de la représentation des connaissances par cadres.

4.5 Scripts

Il s'agit d'une forme spécialisée de représentation des connaissances utilisée pour représenter les séquences d'événements communs. Les scripts décrivent une séquence stéréotypée d'événements dans un contexte donné. Ils sont utiles puisque dans le monde réel, il y a souvent des modèles dans les occurrences d'événements. L'événement initial représente la condition requise au départ pour l'appel de cette séquence. Par exemple, lorsqu'on décide d'aller manger au restaurant (événement initial), toute une séquence d'événements plutôt standard s'ensuit : décider de l'endroit où l'on va manger, comment s'y rendre, s'y rendre, commander un repas, manger, payer et retourner à la maison. Ainsi, les scripts découlent d'une chaîne de relations causales entre les événements.

Les scripts sont utiles pour la modélisation de l'occurrence d'événements qui ne sont pas explicitement énoncés, afin de limiter la redondance. Dans l'exemple qui précède, on ne précise pas généralement que le repas a été payé : ce renseignement est inféré du fait que nous sommes habitués au contexte du restaurant. Dans un script, il n'est pas nécessaire d'énoncer explicitement chaque fait une fois la séquence formalisée. Les scripts sont également utiles lorsqu'il s'agit de faire une simple

interprétation cohérente à partir d'une série d'observations. On peut les utiliser pour attirer l'attention sur les événements les plus inhabituels (comme dans le cas des rapports d'exception, c.-à-d. que l'on veut n'être informé que lorsque quelque chose *ne vas pas* selon les plans).

4.6 Graphes de dépendances conceptuelles

Il y a une autre forme spécialisée de représentation des connaissances que l'on utilise pour exprimer les relations entre les composantes d'une action. Par exemple, la dépendance conceptuelle peut servir à représenter la signification du langage de manière à faciliter les inférences. Elle peut rendre les concepts indépendants du langage original dans lequel ils ont été exprimés. Pour cela, elle identifie un ensemble de primitives ou de composantes de base qui sont combinées pour former des significations de mots dans le langage utilisé. L'ensemble de dépendances permises entre les conceptualisations exprimées est alors identifié pour ces primitives. Les graphes de dépendances sont eux-mêmes des conceptualisations et peuvent donc être utilisés comme composantes de graphes plus grands. Ce schème de représentation accepte aussi les croyances.

Les graphes de dépendances conceptuelles facilitent le raisonnement grâce aux propriétés suivantes :

1. ils requièrent un moins grand nombre de règles d'inférence et celles-ci n'ont besoin d'être exprimées qu'une seule fois dans la représentation;

2. bon nombre des inférences sont déjà contenues dans la représentation elle-même (règles implicites);

3. la structure initiale comprend les discontinuités qui servent à attirer l'attention.

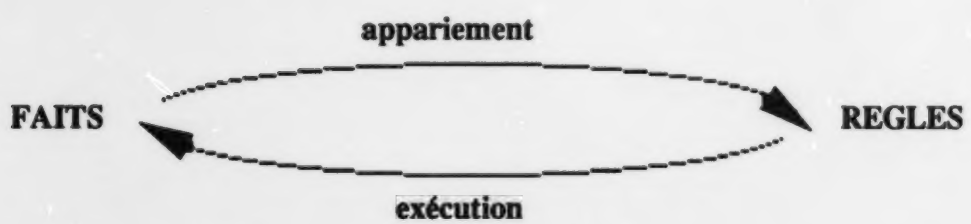
La seule lacune de cette méthode de représentation est la nécessité d'identifier l'ensemble de primitives. Cette identification peut être difficile, voire même impossible, pour certains domaines, ou peut encore ne pas être nécessairement souhaitable car elle pourrait rendre la structure trop redondante et inefficace. D'autre part, aucune expertise ou formation spéciale n'est requise pour créer des graphes de dépendances conceptuelles. L'entité de base est la conceptualisation d'un événement à

représenter et l'assertion des événements qui se sont produits. Ainsi, les graphes de dépendances conceptuelles conviennent davantage à la représentation de certains types d'activités. Ils sont également plus souples pour la représentation des formes plus abstraites de connaissances.

4.7 Méthodes basées sur des règles ou la logique

La représentation des connaissances basée sur des règles décrit des relations, en général à l'aide de règles du type SI-ALORS. Des facteurs de certitude peuvent être rattachés à ces règles pour faire face aux connaissances incertaines. Les règles peuvent également être des variables en ce sens qu'elles peuvent être assorties aux faits sous forme d'une consultation (table de décision ou de correspondance). Ceci permet d'appeler des chaînes d'inférence et de sélectionner la "meilleure" règle pour chaque situation (se reporter à la figure 3 ci-après).

Figure 3. Appariement de modèles



La plupart des structures de connaissance basées sur des règles sélectionnent, à chaque cycle, la première règle correspondante. Cela exige un classement implicite des règles dans la base de données puisque certaines règles sont davantage susceptibles de s'appliquer que d'autres (c.-à-d. de mener à une bonne solution). Au cours de ce processus, des solutions intermédiaires ou partielles peuvent être obtenues. L'indice connexe de croyance ou d'incrédulité de chacune de ces assertions peut également être consigné et révisé à l'aide des mêmes facteurs de certitude.

Les règles constituent donc une façon formelle de représenter les connaissances et de recommander des orientations ou des stratégies quant à l'utilisation de ces connaissances. Cette forme de représentation convient davantage lorsque la connaissance du domaine résulte d'associations empiriques issues d'expériences ou de tests approfondis.

La représentation des connaissances basée sur la logique est un puissant schème fondé sur des règles, qui permet de dériver de nouvelles connaissances à partir des anciennes, à l'aide de dérivations mathématiques. Les deux principales catégories sont la logique propositionnelle et son extension, le calcul des prédicats. Les autres systèmes logiques permettent divers degrés de certitude, d'inférence, d'heuristique et de croyance.

La logique propositionnelle utilise des valeurs vrai-faux alors que la logique des prédicats permet le calcul du degré de "vérité" dans une proposition donnée. Un prédicat soutient un fait au sujet d'une ou de plusieurs entités. La formule atomique d'une règle générique est la suivante :

SI (prémisse). . . ALORS (conclusion)

où la prémisse et la conclusion peuvent être des conditions multiples. La formule atomique de la représentation logique d'un prédicat se présente ainsi :

(prédicat -- termes) . . . assertions.

Par exemple, selon la logique des prédicats, au lieu de dire "la balle est rouge", on dit (balle, rouge). L'avantage de cette dernière approche est qu'elle permet les techniques d'inférence du chaînage ou de la résolution. En d'autres termes, elle se prête mieux aux domaines où de nombreuses connaissances doivent être dérivées au lieu d'être explicitement énoncées. Cependant, il faut noter que la logique garantie que les conditions sont vraies seulement si les prémisses sont vraies au départ ("la qualité des résultats est fonction de la qualité des entrées").

Les autres formes de représentation logique comprennent le raisonnement non monotonique, la logique floue et le raisonnement probabiliste. La logique non

monotonique se distingue de la logique ordinaire en ce que des énoncés peuvent être non seulement ajoutés mais également supprimés de la base de connaissances. Cela est nécessaire pour la plupart des systèmes de croyances puisque celles-ci sont constamment révisées. Par exemple, vous soutenez que la meilleure façon de vous rendre à l'aéroport est votre automobile, jusqu'à ce que vous entendiez un rapport météorologique à la suite duquel vous décidez que la meilleure façon de vous y rendre est l'autobus. Ce type de raisonnement est davantage possible dans le cas du raisonnement non monotonique que dans celui de la logique propositionnelle. En ce qui concerne la logique *monotonique*, les énoncés reconnus comme vrais ne peuvent que croître avec le temps. Dans le cas du raisonnement *non monotonique* ou implicite, le nombre d'énoncés vrais peut augmenter et diminuer. Ce dernier type de raisonnement pose cependant un problème : il faut procéder à des contrôles de cohérence chaque fois que les croyances sont révisées.

Le raisonnement probabiliste permet de représenter les connaissances probables mais incertaines. On s'en sert dans trois grandes situations : lorsque le monde ou le domaine sont vraiment aléatoires, lorsqu'il n'y a pas suffisamment de données et lorsque nous ne comprenons pas à fond le domaine touché. On peut recourir à diverses méthodes d'inférence statistique, telle la théorie des valeurs attendues et le théorème de Bayes, pour décrire les relations existant entre les éléments de connaissances incertains dans ces formes de représentations.

La connaissance peut également être représentée à l'aide d'ensembles flous. Il s'agit de règles heuristiques, ou règles ad hoc, de règles fondées sur un jugement et de raisonnements plausibles, de même que de faits ayant différentes valeurs de vérité. Les diagrammes de connaissances sont par nature des modèles d'ensembles flous. Il peut y avoir une multitude de fonctions entre les différents ensembles flous ou univers de discours. On a donc besoin de règles d'inférence pour construire des catégories d'ensembles flous, qui sont en général du genre "plutôt grand", "moyennement facile", et ainsi de suite. Une représentation de connaissances peut contenir des ensembles flous et leurs relations. Ces schèmes conviennent aux connaissances qui varient telle une variable continue, et aux objets qui ont des propriétés difficilement quantifiables.

On peut le mieux illustrer la représentation logique à l'aide des diagrammes de Venn où les recouvrements désignent des ensembles d'objets ayant des caractéristiques communes. En logique propositionnelle, les propositions sont enchaînées par des

connecteurs tels "et", "ou", pour constituer des propositions composites. Il s'agit d'un moyen utile pour représenter les règles de propagation de la vérité dans les énoncés et également dans les ensembles de règles d'inférence. Dans la logique des prédicats, c'est l'objet qui constitue l'unité élémentaire de la représentation. Les prédicats sont des énoncés de l'objet qui peuvent être vrais ou faux, et ils peuvent s'adresser à plus d'un objet. Ces prédicats sont liés par des connecteurs tels "et", "ou", et ainsi de suite. La représentation logique convient donc parfaitement aux relations de ce type. Le langage IA PROLOG est peut-être le meilleur exemple connu de l'application de la logique des prédicats aux schèmes de représentation des connaissances. À ce jour, les utilisations les plus fructueuses de PROLOG sont les applications d'interrogation de base de données.

4.8 Graphes génétiques

Le graphe génétique est un cadre particulier mis au point pour la modélisation d'étudiants à l'aide d'analogies. Celles-ci sont importantes pour tous les types de représentation des connaissances puisqu'elles aident à organiser ces dernières. Nous avons tendance à construire à partir des connaissances existantes, ce qui signifie que nous faisons largement appel aux analogies pour l'apprentissage et la communication de nos pensées. Les graphes génétiques capitalisent sur l'utilisation des analogies pour dériver des modèles d'étudiants pour les systèmes tutoriels intelligents.

Un bon modèle d'étudiant devrait permettre d'évaluer les caractéristiques suivantes :

1. les connaissances (faits, concepts, aptitudes procédurales) que l'étudiant maîtrise;
2. les éléments de connaissance que l'étudiant ne maîtrise pas;
3. les connaissances que nous croyons qu'il maîtrise mais sans preuve à l'appui;
4. les malentendus ou les écarts procéduraux;
5. toute préférence au niveau du style d'apprentissage.

L'avantage du graphe génétique est qu'il est très souple, qu'il a été utilisé successivement dans de nombreux domaines et qu'il fait appel aux relations analogiques entre les éléments de connaissance ou les concepts. Il s'agit

essentiellement d'un graphe orienté avec des noeuds qui représentent les connaissances (faits, connaissances, aptitudes, écarts, etc.) et des noeuds qui relient ces connaissances de diverses façons (généralisation, composante, analogie, écart, corrections, etc.). Le graphe peut être multidimensionnel, avec diverses relations indiquant la difficulté relative de chaque concept et de ces sous-aptitudes. En outre, les noeuds et leurs relations peuvent être regroupés en îlots pour représenter une simple aptitude ou un ensemble de connaissances relatives à un concept particulier. L'élaboration de liens pré- et post-conditionnels peut servir à décrire les relations entre les conditions préalables.

On trouvera en annexe un exemple de graphe génétique. Il est à noter qu'il peut y avoir des analogies entre les noeuds et entre les sous-graphes. On peut également retrouver n'importe quel type de schème de représentation des connaissances à chacun des noeuds (p. ex. cadres, scripts, etc.). Le but est d'obtenir un modèle dynamique de l'étudiant afin de pouvoir satisfaire aux besoins du plus grand nombre d'étudiants différents possible. La possibilité d'intégrer toute autre forme de représentation des connaissances accroît davantage la souplesse de cette approche.

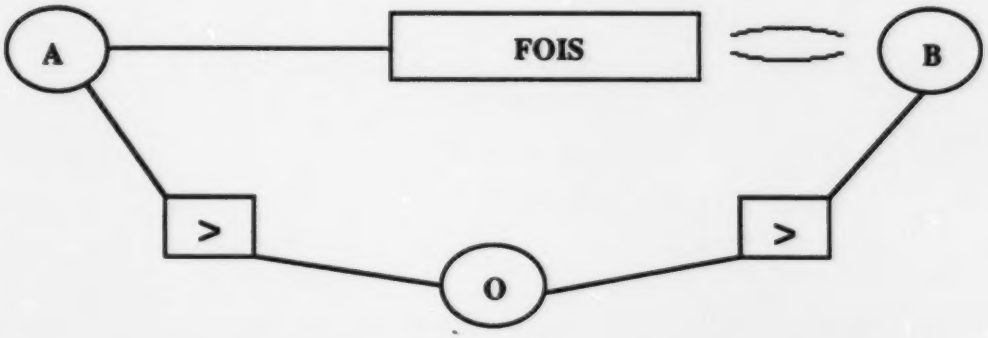
4.9. Réseaux de contraintes

Il s'agit d'une représentation simple d'objets et de leurs relations, dans laquelle les objets sont représentés sous forme de noeuds alors que leurs relations sont exprimées sous forme de contraintes. Deux objets sont reliés si leurs noeuds sont connectés par le biais d'un ensemble de contraintes. Les descripteurs de noeud sont des types spéciaux de relation utilisés pour représenter les parties, les attributs et les propriétés des objets. Ainsi, les réseaux de contraintes constituent un mécanisme simple pour les trois types de représentation des connaissances (alors que les autres schèmes nécessiteraient une structure distincte pour chacun).

Un descripteur de noeud peut contenir soit un objet soit un ensemble d'objets. Les ensembles d'objets permettent la coopération intelligente entre les structures de données qui contiennent de multiples objets du même type, ou des objets du monde réel qui ont souvent des attributs multivalués. Cette organisation peut alors être indexée et ordonnée de manière que l'ensemble soit accessible et puisse être implanté sous forme d'une structure de données.

Les réseaux de contraintes expriment un programme mais sous une forme non procédurale, c'est-à-dire qu'aucun algorithme n'est requis. L'exemple présenté à la figure 4 illustre un réseau de contraintes de la racine carrée. Dans ce cas, on affirme que B fois B égale A et que A et B doivent être plus grands que zéro. Le traitement commence toujours aux noeuds par l'exécution de calculs en vue de trouver d'abord ces valeurs. Le réseau de contraintes, tout comme le réseau sémantique, permet l'héritage des propriétés et offre en plus la possibilité de copier une structure de réseau complète.

Figure 4. Réseau de contraintes de la racine carrée



Une contrainte exprime une relation computationnelle entre les noeuds qu'elle relie. Une contrainte complexe exprime donc la relation dans un réseau distinct de contraintes. De la sorte, une contrainte unique peut servir à formuler un réseau complet de connaissances et à accroître son niveau d'abstraction (représentations des méta-connaissances).

Les structures de contraintes peuvent être transformées, modifiées et déduites grâce aux techniques d'appariement de modèles, semblables à celles des méthodes basées sur des règles ou la logique. Ce schème de représentation est le meilleur moyen de représenter les spécifications non procédurales qui doivent être transformées en spécifications procédurales.

4.10 Réseau de dérivations conceptuelles

Cette forme de représentation des connaissances a été élaborée dans le contexte de la théorie de la conversation et du protolangage Lp, par Gordon Pask. Ce réseau est utile dans les domaines où, pour comprendre un sujet, il faut également comprendre les autres sujets connexes. Ceci est conforme à la conception systémique des connaissances et des structures de connaissance. Les relations sont des caractéristiques essentielles qui servent à caractériser les systèmes de connaissances. Ainsi, on peut décrire les connaissances comme un réseau relationnel ou un réseau de dérivations conceptuelles. Ce réseau identifie non seulement les sujets et leurs relations, mais également les processus cognitifs, les structures et les agrégats de procédures qui y sont associés. La représentation visuelle du domaine obtenue permet de "voir" l'étendue du sujet.

Ce type de réseau ressemble donc davantage à un treillis, comparativement aux schèmes de représentations hiérarchiques ou arborescents traditionnels. On peut considérer le réseau comme un filet, dont les mailles sont les noeuds. N'importe quel noeud peut être temporairement mis en évidence pour désigner un concept cible (auquel il faut accéder ou qu'il faut apprendre). On peut donc ainsi étudier les sujets à différents niveaux et selon différentes perspectives. La structure globale est une forme élevée de connaissance, d'ordre supérieur. Si les sujets pouvaient être sensibilisés à la forme de leurs connaissances sur un sujet particulier, sous forme d'un réseau, on pourrait alors utiliser des méta-processus sur la prise de conscience de ses propres connaissances, "savoir comment apprendre" pour donner une leçon, tenir une conversation ou adopter une stratégie de recherche. Ainsi, chaque réseau représente une façon de penser d'un individu relativement à un domaine, y compris tous les partis pris, malentendus, etc. Ces structures de connaissances personnelles deviennent accessibles aux autres, lorsqu'elles sont présentées sous forme d'un réseau explicite.

Un concept présenté à l'aide de ce type de représentation des connaissances est une représentation mentale ou cognitive d'un objet, d'une idée ou d'un sentiment, un processus mental par lequel nous créons ou recréons des images mentales de ces objets. Les concepts sont contextuels en ce sens qu'ils ont tendance à constituer des agrégats. Un sujet est donc une représentation informatique d'un concept tandis qu'un mappe de concepts est une représentation graphique de la relation entre les concepts, avec indication de la proximité sémantique. La mappe de concepts illustre

l'ordonnancement perçu des concepts par rapport aux autres concepts connexes en vue de l'apprentissage du concept cible (p. ex. hiérarchies temporaires des conditions préalables). Il s'agit en fait d'une stratégie de développement superposée à la représentation des connaissances.

Les réseaux de dérivations conceptuelles conviennent donc très bien aux représentations dynamiques et souples d'un domaine qu'il faut enseigner, apprendre ou communiquer de quelque façon aux autres. Les réseaux peuvent être facilement modifiés, décomposés et réunis pour constituer des structures d'ordre supérieur. Enfin, chaque noeud peut accepter diverses représentations des connaissances déclaratives et procédurales, ce qui en accroît l'utilité.

4.11 Représentations de concepts généralisés

Le modèle de concept généralisé utilise une représentation hybride des connaissances basée sur les cadres et la logique pour des objets du domaine. L'avantage des cadres est la simplicité de l'organisation des connaissances sous forme de taxonomies de cadres génériques qui sont ensuite remplis par des instances particulières. Mais leur principal inconvénient est le manque de sémantique formelle. En combinant cadres et logique, le modèle de concept généralisé comble cette lacune. Les objets du domaine sont logiquement associés avec leurs descripteurs et il y a affinement successif de la représentation des connaissances à l'aide de descriptions conceptuelles semblables à des cadres. Ainsi, ce schème permet une sorte d'héritage contrôlé des propriétés dans le réseau (il n'est plus autonome comme dans le cas des réseaux sémantiques).

Il y a deux types d'objets conceptuels possibles : les concepts et les relations. Un concept est un ensemble d'entités dans un contexte, dont le contenu est similaire. Le contenu informatif d'un concept se compose d'un nombre fini d'attributs, y compris les mappages ou les relations entre le concept et les autres domaines. Chaque attribut est associé à un seul domaine. Les relations sont des liens entre les concepts ou les ensembles de concepts et peuvent prendre l'une des formes suivantes : "c'est un" ou "a un". En outre, les liens eux-mêmes peuvent avoir des attributs. Les représentations de concepts généralisés semblent donc combiner un certain nombre des caractéristiques utiles des autres approches.

BIBLIOGRAPHIE

Chandrsekaran, B. and Mittal, S. (1982). Deep vs. compiled knowledge approaches to diagnostic problem solving. Document presenté à l'AAAI conference, 1982, Pittsburg, Pennsylvanie.

Collins, A. and Quillian, M. (1969). Retrieval time from semantic memory. Journal of Verbal Learning and Verbal Behaviour, 8, 240 à 247.

D'Ambrosio, B. (1985). Expert systems - myth or reality. Byte, Janvier, 1985, 275 à X282.

LaGiadice, D. and Scaruffi, P. (1986). Knowledge modules vs. knowledge base: a structure for representing the granularity of real world knowledge. Proceedings of the 6th Canadian conference on AI, Mai 1986, p. 220 à 224.

McAleese, R. (1985). Some problems of knowledge representation in an authoring environment: exteriorization, anomalous state metacognition and self confrontation. PLET, 22, 4, 299 à 306.

McCalla, G. and Cercone, N. (1983). Approaches to knowledge representation. IEEE Computer, Octobre, 1983, p. 12 à 18.

Michaelson, R., Michie, D. and Boulanger, A. (1985). The technology of expert systems. Byte, Avril, 1985.

Moody, H. (1986). AI: current reality, future promise. Info. Strategy, Hiver, 1986.

Pask, G. (1976). Conversation Theory. Holland: Elsevier.

Pearl, J. and Paz, A. (1986). On the logic of representing dependencies by graphs. Proceedings of the 6th Canadian conference on AI, Mai 1986, p. 94 à 98.

Pracht, W. (1986). GISMO: a visual problem-structuring and knowledge organization tool. IEEE SMC, 16, 2, 265 à 270.

Stefik, M., Aikins, T., Benoit, J., Birnbaum, L., Hayes-Roth, B. & Sacerdoti, E. (1982). The organization of expert systems: a tutorial. AI, 18, 135 à 173.

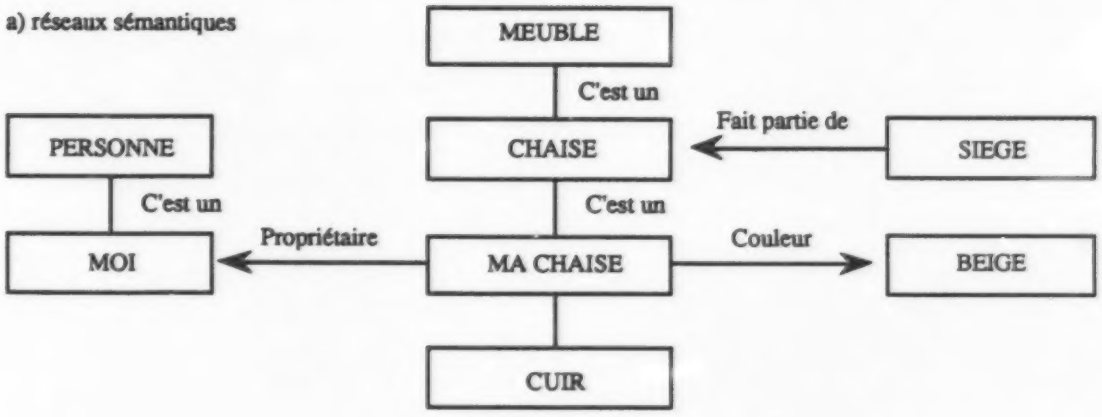
Thompson, B. and Thompson, W. (1985). Inside an expert system. Byte, Avril, 1985, 315 à 330.

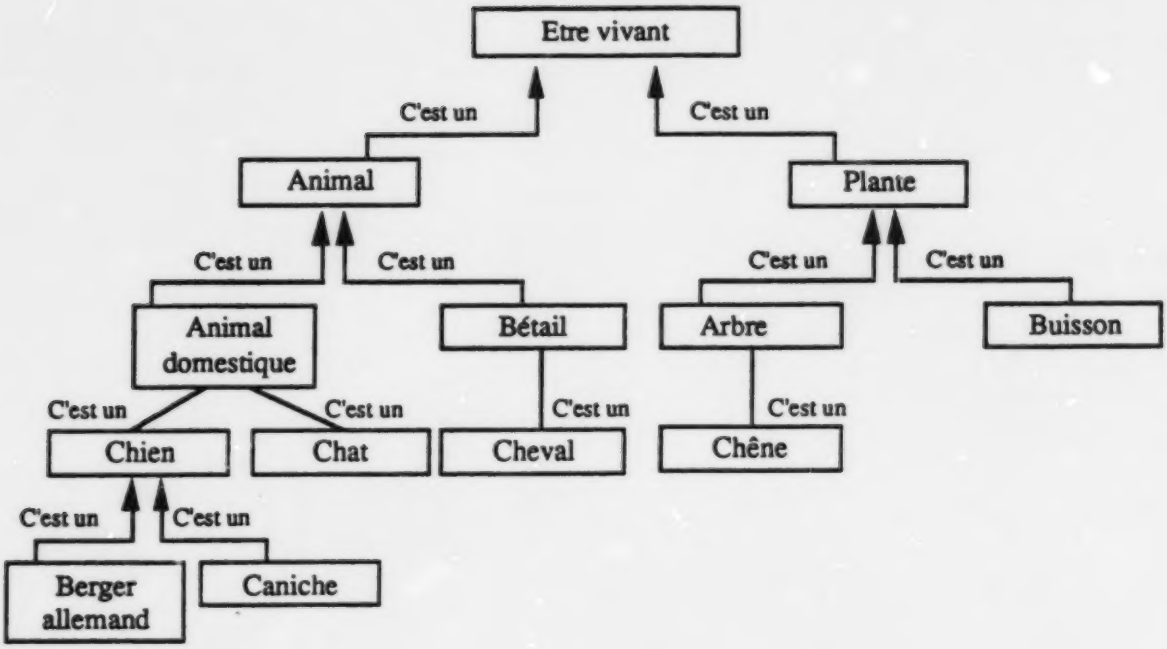
Wellsch, K. and Jones, M. (1986). Detecting analogous learning. Proceedings of the 6th Canadian conference on AI, Mai 1986, p. 17 à 23.

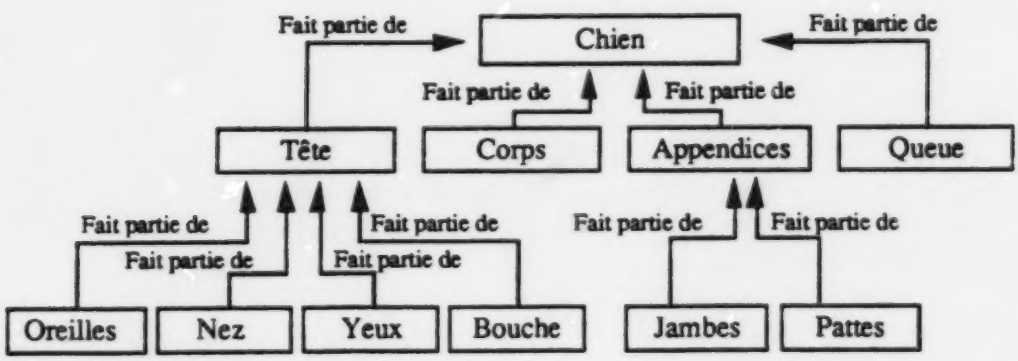
Zadeh, L. (1983). Common sense knowledge representation based on fuzzy logic. IEEE Computer, Octobre, 1983, p. 61 à 65.

ANNEXES: DIAGRAMMES DES DIFFÉRENTES FORMES DE REPRÉSENTATIONS DES CONNAISSANCES

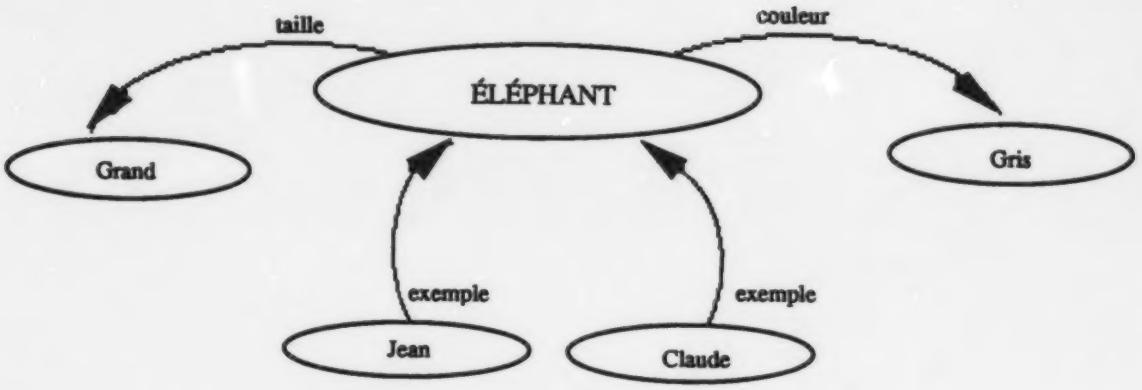
a) réseaux sémantiques

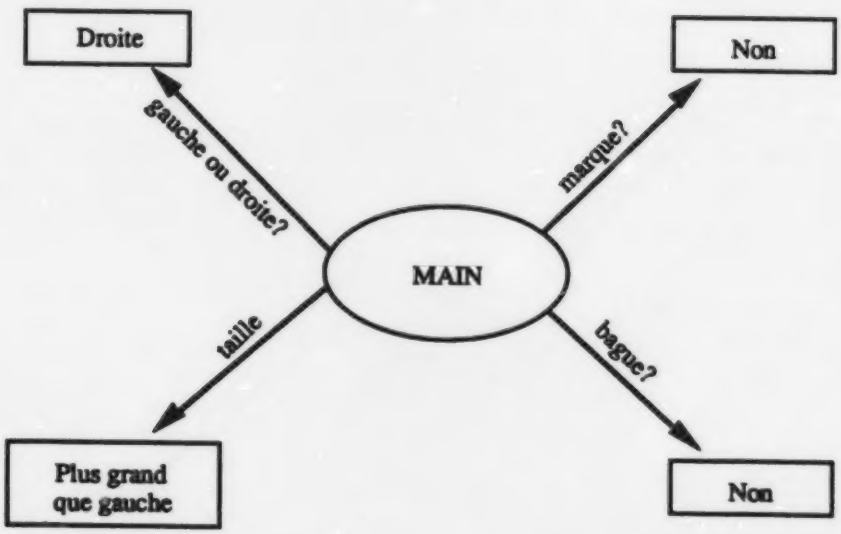



Etre vivant
C'est un
C'est un
Animal
Plante
C'est un
C'est un
C'est un
C'est un
Animal domestique
Bétail
Arbre
Buisson
C'est un
C'est un
C'est un
C'est un
Chien
Chat
Cheval
Chêne
C'est un
C'est un
Berger allemand
Caniche

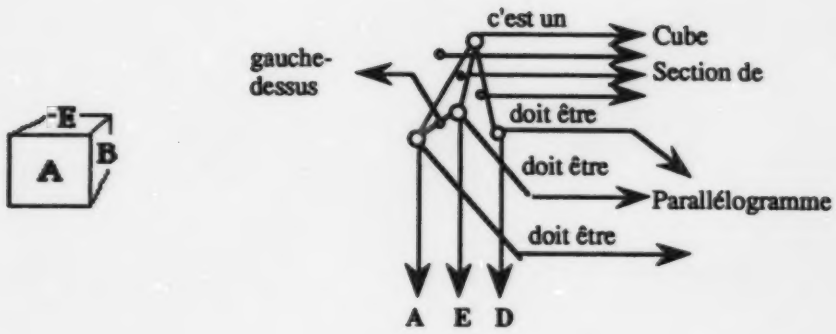

Fait partie de
Chien
Fait partie de
Fait partie de
Fait partie de
Tête
Corps
Appendices
Queue
Fait partie de
Fait partie de
Fait partie de
Fait partie de
Fait partie de
Fait partie de
Oreilles
Nez
Yeux
Bouche
Jambes
Pattes

b) Triples objet-attribut-valeur

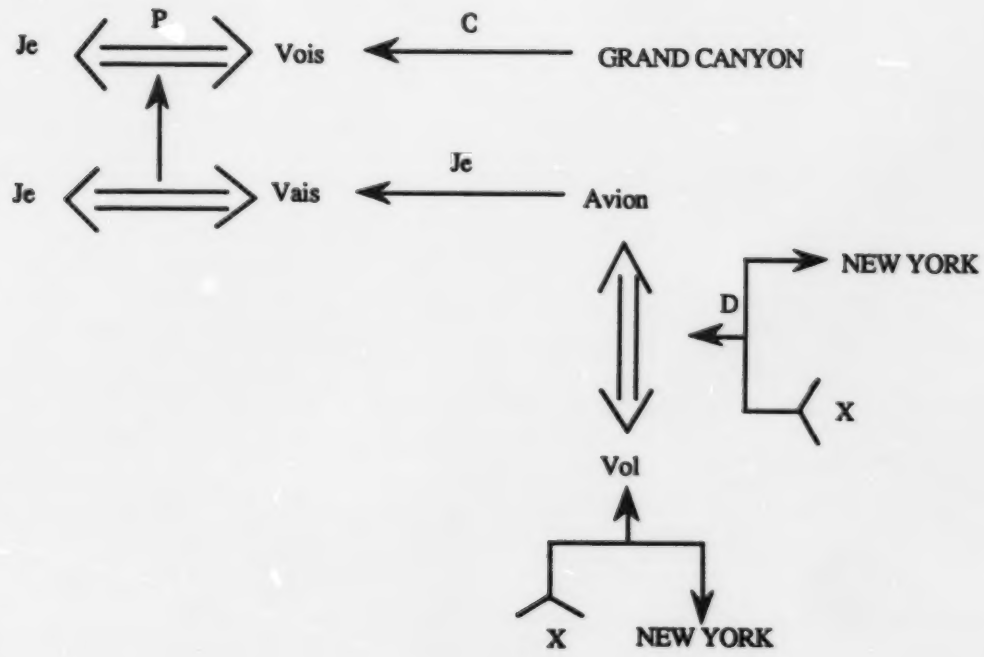




c) Cadres

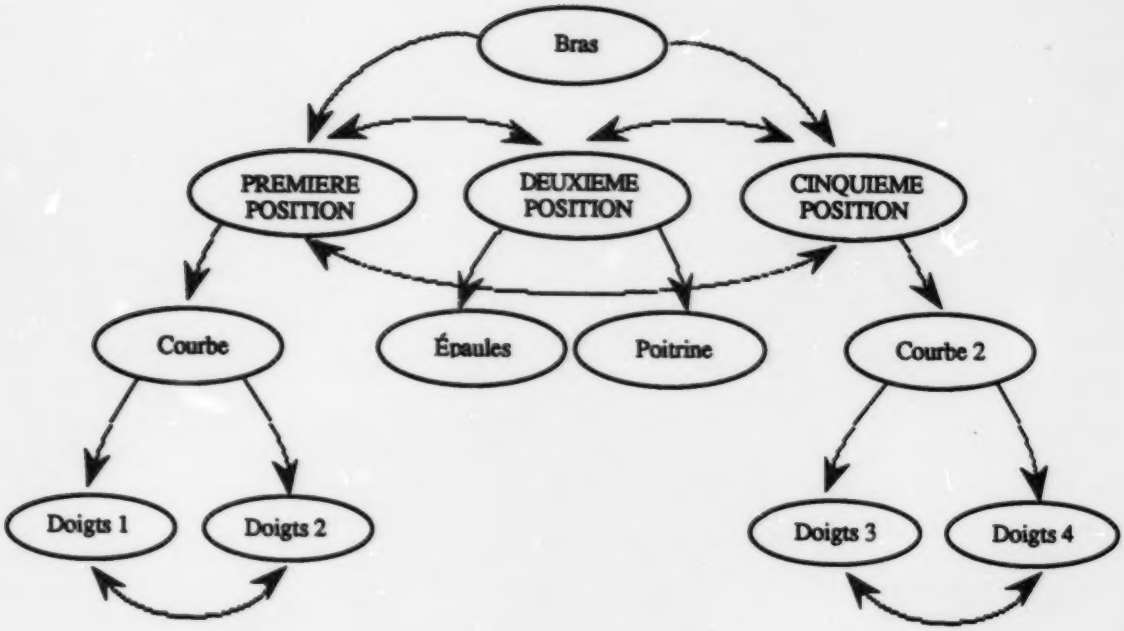
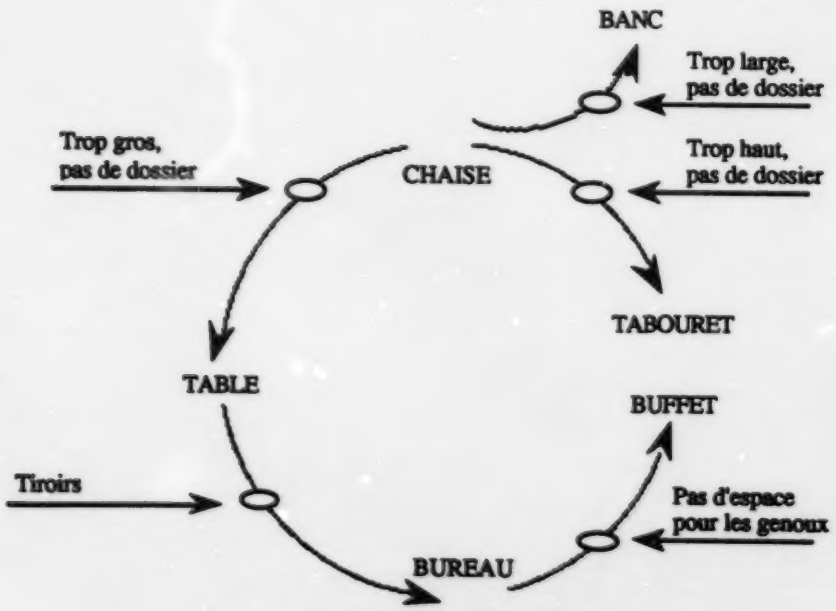


d) Graphes de dépendances conceptuelles



Un graphe de dépendances conceptuelles pour la phrase "J'ai vu le Grand Canyon de l'avion me menant à Chicago". (Schank, 1971, reproduction autorisée.)

e) Graphes génétiques



f) Réseaux de similarités